نقش هندسه‌ی بلوک‌های شوت در اتلاف توان فرسایشی جریان*

سبحان مرادی[۱] حامد شهسواری[۲] کاظم اسماعیلی[۳]

چکیده *انرژی زیاد نهفته در جریان خروجی از روی سرریزها، با طراحی سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی در شوت و یا حوضچه‌ی آرامش پایین‌دست کنترل می‌شود. بااین‌حال رخداد آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست، یکی از بزرگ‌ترین خطراتی است که پایداری سرریزها را تهدید می‌کند. در پژوهش آزمایشگاهی حاضر؛ ابتدا با انجام آزمایش‌های شاهد (شوت بدون مانع) در اعداد فرود مختلف، به بررسی هندسه‌ی گودال آب‌شستگی پرداخته شد، آن‌گاه با ارائه‌ی روش حفاظتی پایه‌ی بلوک با ارتفاع ثابت در سه شکل هندسی (مستطیل، نیم‌دایره، مثلث)، چهار موقعیت نصب به‌صورت نسبتی از طول کل شوت L_b/L_f برابر (۰/۲، ۰/۴، ۰/۶، ۰/۸) و هم‌چنین، جهت تقعر- تحدب نصب بلوک‌ها، پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی اندازه‌گیری شد و با انجام تحلیل ابعادی به‌روش پای- باکینگهام مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پایه‌ی بلوک روی شیب شوت در همه‌ی مدل‌های مورد آزمایش، بر مقادیر ابعادی آب‌شستگی تأثیرگذار بوده و همواره سبب کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی شده‌است. به‌طور خلاصه، ۱. عمق و طول نهایی آب‌شستگی با افزایش عدد فرود بالادست سرریز، افزایش می‌یابد. ۲. در سری آزمایش‌های تقعر در برابر جریان بلوک‌ها، همواره پارامترهای ابعادی آب‌شستگی دارای مقادیر کمتری نسبت به تحدب دربرابر جریان بوده‌اند. ۳. با کاهش فاصله‌ی نصب بلوک‌ها نسبت‌به پنجه‌ی سرریز، کاهش آب‌شستگی در عمق و طول افزایش می‌یابد، به‌طوری‌که در موقعیت (L_b/L_f=0.8) بیشترین استهلاک انرژی نسبت به سایر موقعیت‌ها رخ داده‌است و در شرایط مختلف جریان بین ۱۵ تا ۶۱/۲ درصد کاهش عمق گودال آب‌شستگی را به‌همراه دارد. ۴. در موقعیت (L_b/L_f=0.6)، بلوک‌های مستطیلی و نیم‌دایره‌ای با تحدب دربرابر جریان و هم‌چنین، در موقعیت (L_b/L_f=0.8) بلوک مثلثی با تقعر در برابر جریان، با عملکرد متوسط ۳۸/۱ تا ۷۳/۴ درصد، بیشترین کاهش را در طول آب‌شستگی نسبت به سایر حالت‌ها دارا می‌باشند. ۵. با افزایش عدد فرود جریان در بالادست تاج سرریز، انرژی نسبی مستهلک‌شده‌ی جریان در پنجه شوت، کاهش می‌یابد.*

واژه‌های کلیدی هندسه‌ی بلوک، گودال آب‌شستگی، الگوی نصب موانع، استهلاک انرژی.

The Role of chute Blocks Geometry in Current Erosion Power Loss

S. Moradi H. Shahsavari K. Esmaili

Abstract *The high energy impinging on the outflow through the overflows is controlled by the design of the energy absorber structures in the downstream or downstream relaxation pool. However, the occurrence of downstream local scour is one of the major threats to the stability of the overflows. In the present laboratory research, first, by conducting control experiments (unimpeded shot) at different landing numbers, the geometry of the scour pit was investigated, then by providing a basic block-height protection method in three geometric shapes (Rectangular, Semicircular, Triangle), four mounting positions proportional to the total L_b/L_f shot length (0.2, 0.4, 0.6, 0.8) and also, to concave the installation of blocks, the dimensions of the scour pit are measured and Dimensional analysis was performed using Pie-Buckingham method. The results showed; The use of block base on the slope of the shot in all the models tested has an effect on the dimensionality of the scour and has always reduced the dimensions of the scour pit. In summary: 1. The depth and final length of the scour increases with the increase in the number of upstream landing overflows. 2. In the series of upward concave tests, blocks always have lower values of scour dimension than low facing concave. 3. By decreasing the installation distance of the blocks from the overflow claw, the scour depth and length decrease. So that at position (Lb/Lf = 0.8) the highest energy damping occurred at other positions. And under different conditions the flow decreases between 15 to 61.2% of the depth of the scour pit. 4. In position (Lb/Lf = 0.6), semicircular and rectangular blocks with low upward concavity and also in position (Lb/Lf = 0.8) triangular block with high upward concavity, with average yield 38/1 to 73/4% had the highest decrease during scour compared to other states. 5. By increasing the number of downstream currents, the relative damping energy of the current in the shoot paw decreases.*

Key Word Block Geometry, Scour hole, Barrier Pattern, Energy Depreciation.

* تاریخ دریافت مقاله ۹۹/٤/۱ و تاریخ پذیرش آن ۹۹/۷/۲۲ می‌باشد.

(۱) دانشجوی دکترا، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۲) دانشجوی دکترا، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
(۳) دانشیار، سازه‌های آبی، گروه مهندسی آب، دانشگاه فردوسی مشهد.
Email: esmaili@um.ac.ir

مقدمه

هنگامی که تراز آب از ظرفیت ذخیره‌ی مخزن فراتر رود، جریان خروجی از روی سرریزها با انرژی بالایی عبور می‌کند و به‌دلیل سرعت زیاد جریان در پنجه، می‌تواند سبب ایجاد فرسایش قابل‌توجهی در اطراف پی سازه شود و پایداری آن را با خطرات جدی روبه‌رو کند. ازاین‌رو آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزها یکی از موضوعات مهم و کاربردی است که توسط محققان زیادی به‌منظور شناسایی متغیرهای حاکم بر این پدیده به‌منظور ارائه‌ی راه‌حل‌های مناسب، مورد بررسی قرار می‌گیرد. تاکنون، برای افزایش اتلاف انرژی و جلوگیری از آب‌شستگی بستر فرسایش‌پذیر در پایین‌دست سرریزها، از برخی سازه‌های مستهلک‌کننده‌ی انرژی هم‌چون حوضچه‌ی آرامش و یا شوت‌ها استفاده شده است، اما ساخت حوضچه‌های آرامش هزینه‌های زیادی را به طرح تحمیل می‌کند. ازاین‌رو، همواره ارائه و بررسی راه‌حل‌های جایگزین با هزینه‌ی کمتر، مورد توجه است. در چند دهه‌ی اخیر محققان زیادی بااستفاده از انواع تیپ حوضچه‌های آرامش USBR و ارائه‌ی طرح‌های جدید در این سازه به بررسی استهلاک انرژی جنبشی پرش هیدرولیکی در پایین‌دست سرریز پرداخته‌اند؛ از آن جمله تحقیق درگاهی است که در سال ۲۰۰۳ با بررسی توسعه‌ی آب‌شستگی در پایین‌دست سرریز بیان نمود که با افزایش زبری حوضچه‌ی آرامش باوجود این‌که تغییر به‌خصوصی در الگوی معمولی جریان شکل نمی‌گیرد، اما باعث کاهش شدید انتقال رسوب می‌گردد و گودال آب‌شستگی نسبت‌به حالت بدون زبری ۱۷ الی ۵۷ درصد کوچک‌تر می‌شود [1].

به‌منظور کاهش آب‌شستگی پایین‌دست سرریز، با به‌کارگیری یک ردیف بلوک نیم‌دایره‌ی بافلی در حوضچه‌ی آرامش نشان داده شد که اجرای بافل روی مشخصه‌های گودال آب‌شستگی مؤثر است و مقدار کاهش عمق آب‌شستگی نهایی از ۵۱/۸۶ درصد به ۶۳/۸۱ درصد افزایش یافته است [2].

در مطالعه‌ای آزمایشگاهی بااستفاده از الگوهای متنوع کف‌بند سنگ‌چین (بدون سنگ‌چین، سنگ‌چین یک‌ردیفه و سنگ‌چین کامل با ارتفاعات مختلف) میزان کاهش آب‌شستگی پایین‌دست سازه‌های هیدرولیکی مورد بررسی قرار گرفت. مشاهده شد که الگوی اجرایی کف‌بند کامل، مقادیر کمتری از آب‌شستگی را نشان می‌دهد [3].

هلال[4] در سال ۲۰۱٤ با ارائه‌ی ایده‌ای جدید، سیستمی از جت‌های آب خروجی از کف‌بند حوضچه‌ی آرامش ساده در پایین‌دست یک سازه را برای کنترل پرش هیدرولیکی طراحی کرد و گزارش داد که حداکثر عمق آب‌شستگی درمقایسه با مدل کف‌بند بدون جت‌های آب از ۵۰ درصد به ۹۰ درصد کاهش یافته‌است.

نتایج حاصل از آب‌شستگی پایین‌دست شوت‌ها متأثر از پارامترهایی هم‌چون استغراق پای‌آب، نوع سرریز جریان و طول کف‌بند سنگ‌چین گزارش شده‌است. سپس بااستفاده از داده‌های آزمایشگاهی و تحلیل انرژی جنبشی آشفته و توزیع سرعت در نزدیکی بستر فرسایشی، دو رابطه‌ی تجربی برای پیش‌بینی عمق و طول آب‌شستگی پایین‌دست سرریز اوجی ارائه شد [5].

طراحی فنی بلوک‌های بافل در حوضچه‌های آرامش، نشان داد که به‌دلیل لزوم وجود فاصله‌ی مناسب بین بلوک‌ها و عبور جریان از میان آن‌ها می‌توان به‌طور حداکثر ٤۰ تا ۵۵ درصد از عرض کف را اشغال نمود [6].

از لحاظ فنی و اقتصادی، رویکرد غالب برخی محققان به حذف حوضچه‌های آرامش پرهزینه و جایگزینی روش‌های اتلاف انرژی در طول مسیر شوت است. ازاین‌رو تکنیک‌های مختلفی برای افزایش اتلاف انرژی در شوت سرریزها که سبب کاهش آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست می‌شود، ارائه شده‌است. اجرای شیب پلکانی و یا نصب بلوک‌های بافل روی شیب شوت و یا کف حوضچه، ازجمله روش‌های مؤثر بر افزایش اتلاف انرژی و کاهش طول پرش هیدرولیکی

در طول مسیر عبور جریان به‌سمت پایین‌دست است که امروزه مورد توجه محققان قرار گرفته است.

دررا ستای ارائه‌ی ضوابط فنی در طراحی شوت، تونا [7] در سال ۲۰۱۲ به بررسی تأثیر زاویه‌ی شیب سرریزهای پلکانی نسبت به افق برروی مشخصه‌های گودال آب‌شستگی پرداخت و درنهایت در گزارش‌های خود، زاویه‌ی ۳۰ درجه را بهینه‌ترین موقعیت برای طراحی و اجرای این نوع سرریزها معرفی کرد.

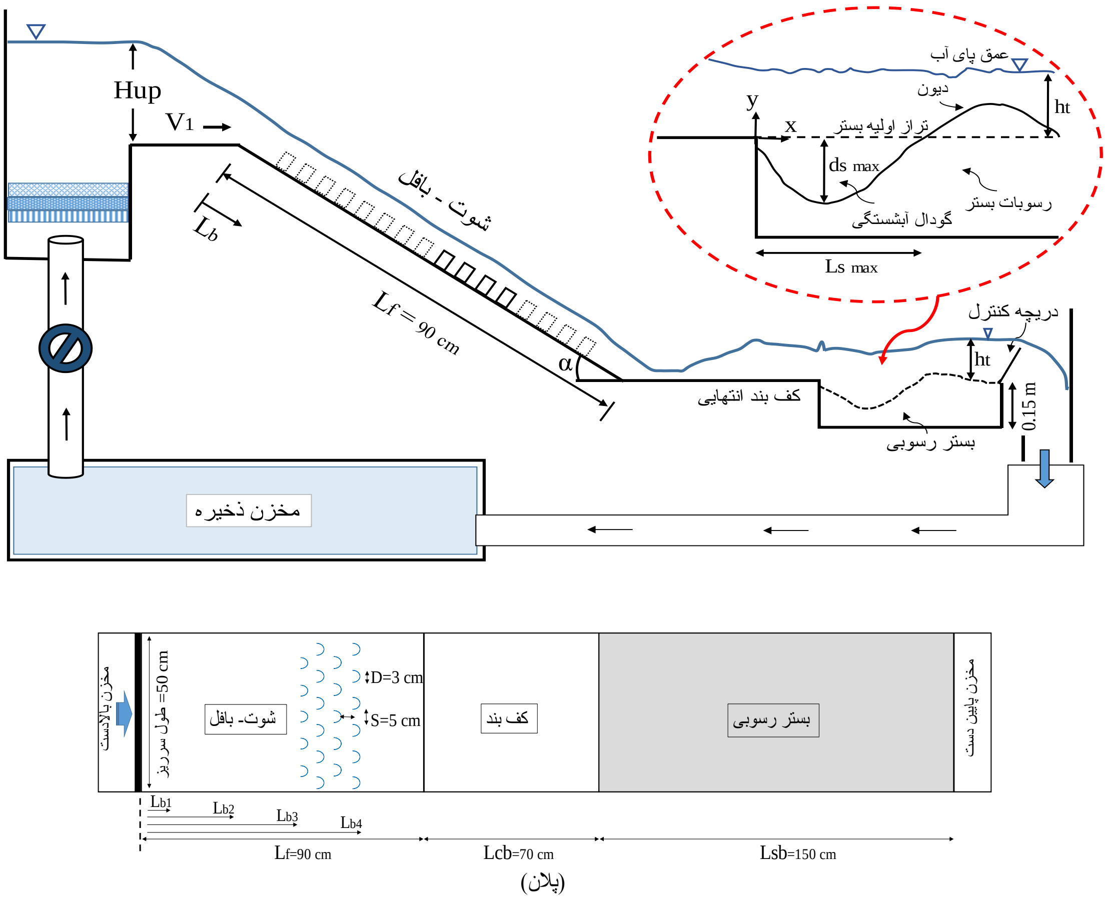
پترکا [8] در سال ۱۹٦٤ سازه‌ی شوت با بلوک‌های بافل را نوعی اتلاف‌کننده‌ی ضربه‌ای انرژی جریان معرفی کرد. او معتقد بود که بلوک‌های بافل در شوت سبب کاهش سرعت جریان نمی‌شود، بلکه با کاهش شتاب جریان، انرژی جنبشی در پایین‌دست را کم می‌کند. پس شرایط مطلوب‌تر زمانی خواهد بود که بلوک‌ها عمود بر جریان ورودی قرار می‌گیرند. هیدرولیک جریان در سرریزهای اوجی پلکانی نشان می‌دهد که افزایش اتلاف انرژی جنبشی در پایین‌دست و هم‌چنین کاهش طول پرش هیدرولیکی در درجه‌ی اول به‌نسبت عمق بحرانی به ارتفاع پله و تعداد پله وابسته است [9]. اضافه شدن پله‌ی سرریزهای پلکانی، سبب تضعیف قدرت جت آب می‌شود و انرژی در پایین‌دست را ۷۵ درصد کاهش می‌دهد [10]. با مدل‌سازی آزمایشگاهی تأثیر انحنای پایین‌دست و زاویه‌ی آستانه‌ی انتهایی سرریز بر آب‌شستگی موضعی در پایین‌دست، مشاهده می‌شود که وقتی زاویه‌ی آستانه‌ی انتهایی سرریز از ۱۰ به ٦۰ درجه تغییر یابد، عمق آب‌شستگی پایین‌دست، کاهش ۱۵ درصدی را نشان می‌دهد [11]. پلکان عمق جریان در پنجه‌ی سرریز را حدود ۲۰ برابر شوت‌های صاف معمولی بالا می‌برد و درنتیجه انرژی باقی‌مانده در پنجه حدود ٦ تا ۷ برابر نسبت به شوت صاف کاهش می‌یابد [12]. سرریز با پروفیل پلکانی دارای اتلاف انرژی بیشتری نسبت به پروفیل صاف است. اتلاف انرژی به‌طور معکوس با تخلیه‌ی جریان متناسب است و هم‌چنین در رژیم جریان ریزشی اتلاف انرژی بیشتری نسبت‌به رژیم جریان صاف رخ می‌دهد [13]. زارع [14] و دورینگ در سال ۲۰۱۲ تأثیر نصب بافل‌ها و کف‌بندهای سنگ‌چین بر اتلاف انرژی جریان روی سرریزهای مانع‌دار با لبه‌های تیز یا گرد و یک ورودی اوجی را مورد بررسی قرار دادند. آنها دریافتند که نرخ اتلاف انرژی بالاتری را می‌توان در شرایط نصب بافل درمقایسه‌با سنگ‌چین روی شیب شوت‌ها به‌دست آورد.

تاکنون مطالعات انجام‌شده برروی شوت‌های مانع‌دار در شرایط استفاده از بلوک‌های مستطیلی USBR بوده‌است. طرح‌های پژوهشی محدودی درزمینه‌ی تأثیر شکل‌های متفاوت از هندسه‌ی بلوک‌ها بر افزایش اتلاف انرژی و کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی در پایین‌دست سازه‌های کنترل جریان مورد بررسی قرار گرفته‌است. بررسی‌های آزمایشگاهی روی تأثیر پایه‌های بلوک T شکل، ذوزنقه‌ای و پلکانی در دو شیب متفاوت بستر شوت بر اتلاف انرژی جریان عبوری از روی این سازه، نشان دادند که بلوک Tشکل ازنظر افزایش اتلاف انرژی و میزان اکسیژن ورودی به جریان از هندسه‌های دیگر عملکرد بهتری داشته‌است [15]. کریمی [16] و همکاران در سال ۲۰۱۹ تأثیر واگرایی دیوار شوت با سه هندسه‌ی مختلف (بلوک بافل مستطیلی، سه‌ضلعی و بلوک‌های نیم‌دایره‌ای) را با ساخت مدل فیزیکی در آزمایشگاه برروی عمق و ابعاد گودال آب‌شستگی در پایین‌دست شوت، مورد بررسی قرار دادند. برای این منظور ۹ مدل شوت بافل‌دار با نسبت‌های واگرایی (۱، ۱/٤۵، ۱/۷۵و ۲/٤۵) ساخته شد. با مقایسه‌ی نتایج مربوط به اثر هندسه‌ی بلوک در نسبت‌های مختلف واگرایی، مشخص شد که استفاده از بلوک‌های پیشنهاد شده در این تحقیق به‌جای بلوک‌های استاندارد *USBR*، به‌طور متوسط، تا حداکثر ۵۰ درصد عمق گودال آب‌شستگی را کاهش می‌دهد. برای یک هندسه‌ی مشخص از بلوک، میانگین و حداکثر عمق و طول گودال آب‌شستگی به‌ترتیب ۷۵، ۵۸ و ۵۰ درصد کاهش یافته‌است.

مطابق پیشـــینه‌ی پژوهش انجام‌شـــده و اهمیت موضوع آب‌شستگی در پای سرریزها، پژوهش حاضر با بر سی تأثیر نصب پایه‌ی بلوک‌های مستطیلی، مثلثی و دایره‌ای روی شـــوت با هدف کنترل توان فرســـایشـــی جر یان در پنجه‌ی ســـرریز ها (کاهش عمق و طول آب شستگی)، می‌تواند با هزینه‌ای کمتر جایگزینی برای بلوک‌های روی تنداب USBR و یا حوضچه‌های آرامش پیچیده و پرهزینه با شد. آزمایش‌ها در شرایط تنوع عدد فرود ورودی به بررســـی تأثیر الگوی نصـــب و شـــکل هند سی بلوک‌ها بر افت انرژی در طول مسیر حرکت از روی سرریز تا پای شوت پرداخته‌است.

مواد و روش‌ها

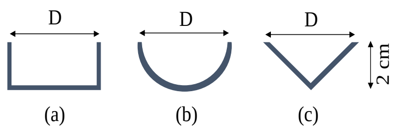
آزمایش‌ها در آزمایشـــگاه مدل‌های هیدرولیکی دانشـــگاه فردوسی مشهد انجام شد. مدل آزمایشی در کانالی مجهز به سیستم چرخش آب به طول، عرض و ارتفاع به‌ترتیب ٦، ۰/۵ و ۰/۵ متر ساخته شد. کانال از شیشه ساخته‌شد تا امکان بازرسـی بصـری از آزمون در دسـت بررسـی، فراهم شـود. دریچه‌ای در پایین‌دسـت برای تنظیم عمق پای‌آب تعبیه شـــد. ســـرریز به‌همراه شـــوت مطابق با دســـتورالعمل USBR با عرض و ارتفاع به‌ترتیب ۰/۵ و ۰/۳ متر و مطابق توصیه‌ی تونا در سال ۲۰۱۲، در شیب با زاویه‌ی بهینه‌ی ۳۰ درجه انتخاب و طراحی شـــد [7] (شکل ۱).



شکل ۱ شماتیکی از کانال و پلان مدل‌سازی آزمایشگاهی

طراحی فنی بلوک‌های بافل در شوت مورد بررسی قرار گرفت. تعداد بلوک های موجود در هر ردیف از مدل مورد آزمایش، مطابق با توصیه‌ی بلایسدل در سال ۱۹٤۸ در محدوده‌ی ٤۰–۵۰ درصدی از عرض کف شوت انتخاب شد [6]. در هر ردیف ٦ عدد بلوک به‌عرض دهانه‌ی ثابت (D) برابر ۳ سانتی‌متر نصب شد. مطابق دستورالعمل USBR عمق جریان برروی شوت بدون پایه‌ی بلوک در شرایط دبی طراحی، یک مرجع تجربی برای انتخاب ارتفاع مناسب بافل است. ازاین‌رو، ارتفاع هر بلوک ۱/۵ سانتی‌متر و فاصله‌ی بلوک‌ها از هم در ردیف عرضی و طولی، برابر ۵ سانتی‌متر انتخاب شد. چهار جانمایی برای ردیف‌های پایه‌ی بلوک روی شیب شوت درنظر گرفته‌شد تا بهترین عملکرد آرایش چهارردیفه‌ی پایه‌ها از نظر موقعیت نصب مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین موقعیت نصب پایه‌ها به‌صورت نسبتی از کل طول شیب شوت (۰/۸ و ۰/٦، ۰/٤، L_b/L_t=۰/۲) انتخاب شد (شکل ۱ و ۲).

به‌منظور بررسی تأثیر فرم هندسی پایه‌های بلوک با مشخصات هندسی ارائه شده، سه حالت مطابق شکل (۲) درنظر گرفته‌شد. لازم به ذکر است که تمام مشخصه‌های ابعادی پایه‌ی بلوک‌ها به‌جز شکل هندسی در تمام آزمایش‌ها ثابت درنظر گرفته‌شد.



شکل ۲ اشکال هندسی بلوک‌های بافل: (a) بلوک مستطیلی (REB)، (b) بلوک نیم‌دایره‌ای (SCB)، (c) بلوک مثلثی (TRB)

ضخامت و طول بستر رسوبی (L_{sb}) بعد از کف‌بندی ثابت سرریز برمبنای آزمایش‌های مقدماتی، در حالت شوت صاف (بدون پایه)، به‌ترتیب ۰/۱۵ و ۱/۵ متر تعیین شد تا جوابگوی عمق و طول حداکثری گودال آب‌شستگی در تمام آزمایش‌ها باشد. همچنین طول کف‌بند ثابت (L_{cb}) بعد از پنجه‌ی سرریز ۷۰ سانتی‌متر انتخاب گردید. در اینجا نیز طول انتخاب شده در آزمایش‌های شاهد (شوت بدون پایه) مناسب طول پرش هیدرولیکی در بالاترین عدد فرود بوده‌است. طبق نظریه‌ی رادکیوی و اتما در سال ۱۹۸۳ برای جلوگیری از تشکیل ریپل در طول آزمایش باید قطر متوسط ذرات بیش از ۰/۷ میلی‌متر باشد. هم‌چنین زمانی‌که انحراف معیار هندسی ذرات کمتر از ۱/۳ است می‌توان از تأثیر غیریکنواختی ذرات بر عمق آب‌شستگی صرف‌نظر کرد [17]. بنابراین طبق معیارهای فوق از رسوبات غیرچسبنده با قطر متوسط ۰/۷۲ میلی‌متر، وزن مخصوص ۲/٦۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و انحراف معیار هندسی ۱/۱۲ استفاده شد.

آزمایش‌ها در دبی‌های ۱۲، ۱٦، ۲۰، ۲٤ و ۲۸ لیتر بر ثانیه در واحد عرض انجام شد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود به‌ازای هر دبی، یک عدد فرود در بالادست سرریز به‌وجود آمده‌است. سرعت نزدیک‌شونده به تاج سرریز به‌اندازه‌ی کافی از سرعت بحرانی کمتر است. گفتنی است که برای اندازه‌گیری تراز سطح آب و پروفیل بستر در جهت طولی و مقطع عرضی کانال (با دقت ۰/۱ میلی‌متر) از خط‌کش داده‌بردار نقطه‌ای استفاده شد.

روابط مربوط به پرش کلاسیک از جمله عدد فرود اولیه و عمق ثانویه‌ی پرش ارائه شده‌است:

$$y_2 = \frac{y_1}{2}\left(\sqrt{1 + 8Fr_1^2} - 1\right) \quad (۱)$$

$$Fr_1 = \frac{q}{\sqrt{g}y_1^{\frac{3}{2}}} \quad (۲)$$

$$E = y + \frac{V^2}{2g} \quad (۳)$$

در اینجا؛ y_1 و y_2 به‌ترتیب عمق اولیه و ثانویه‌ی پرش هیدرولیکی(متر)، Fr_1 عدد فرود اولیه (بی‌بعد)، q دبی در واحد عرض (مترمربع بر ثانیه)، می‌باشند. هم‌چنین رابطه‌ی اتلاف انرژی نسبی به‌صورت ($\Delta E/E_{up}$) ارائه‌شد که در آن $\Delta E = E_{up} - E_2$، E_{up} انرژی بالادست و E_2 انرژی در عمق ثانویه‌ی پرش است.

جدول ۱ ویژگی آزمایش‌ها

پارامتر	Q(lit/s)	H_{up}(cm)	Fr_{up}	Re_{up}
مقدار	۱٤ – ٦	٤/٥ – ۲/٥	۰/۹٦۹ – ۰/۹۳٦	۲۷۹۱٦ – ۱۱۹٦٤

آنالیز ابعادی

مطابق رابطه‌ی (٤) آب‌شستگی موضعی پایین‌دست یک سرریز به تعداد زیادی از متغیرهای بعددار و بدون‌بعد وابسته است، اما بررسی تأثیر مجزای هر پارامتر بر نتایج آزمایش‌ها کاری بس دشوار است، لذا، برای سهولت در تحلیل نتایج، در این مقاله با انجام تحلیل ابعادی برروی متغیرهای تأثیرگذار و به‌دست آوردن نسبت‌های بدون‌بعد، تأثیر هم‌زمان چند پارامتر بر نتایج آزمایش مورد بررسی قرار گرفت. لازم به ذکر است که در پژوهش حاضر از روش پای- باکینگهام برای انجام تحلیل ابعادی استفاده شد.

$$d_s = f\begin{pmatrix} B, D, H_u, V_{up}, h, SF, L_b, L_f, L_s, L_{cb} \\ , g, y_1, y_2, \rho_w, \rho_s, \mu, S, S_0, d_{50}, h_t \end{pmatrix} \quad (٤)$$

که در اینجا، d_s حداکثر عمق آب‌شستگی (متر)، B عرض شوت (متر)، D عرض دهانه‌ی بلوک (متر)، H_{up} هد آب در بالادست سرریز، V_{up} سرعت متوسط جریان (متر بر ثانیه)، h ارتفاع بلوک (متر)، SF پارامتر شکل بلوک، L_b فاصله اولین ردیف بلوک تا تاج سرریز (متر)، L_f طول شوت (متر)، L_s طول آب‌شستگی نهایی (متر)، L_{cb} طول کف‌بند، g شتاب ثقل (متر بر مجذور ثانیه)، y_1 عمق اولیه‌ی پرش‌هیدرولیکی (متر)، y_2 عمق ثانویه‌ی پرش‌هیدرولیکی (متر)، ρ_w و ρ_s به‌ترتیب چگالی آب و رسوبات (چگالی نسبی $S_g = \frac{\rho_s}{\rho_w}$) (کیلوگرم بر مترمکعب)، μ لزجت دینامیکی آب (کیلوگرم بر متر در ثانیه)، S_0 شیب کف کانال (بدون بعد)، S فاصله‌ی بلوک-ها از هم در یک ردیف (متر)، d_{50} قطر متوسط ذرات رسوبی بستر (میلی‌متر)، h_t عمق پای‌آب (متر)، می‌باشند.

برخی از پارامترهای ارائه‌شده در رابطه‌ی (٤) به‌دلیل ثابت بودن در تمامی آزمایش‌ها، حذف شدند. هم‌چنین در تعیین پارامترهای آب‌شستگی، تأثیر ویسکوزیته اهمیت کمتری دارد و به دلیل این‌که اساسا جریان ثقلی است، از اثر عدد رینولدز جریان نیز چشم‌پوشی شده‌است. در نهایت با رسم گراف‌هایی از تقابل نسبت-های بدون‌بعد (رابطه۵) تأثیر تمامی متغیرهای مستقل مؤثر بر آزمایش مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت:

$$f\left(Fr_{up}, SF, \frac{d_s}{H_{up}}, \frac{L_b}{L_f}, \frac{L_s}{H_{up}}\right) = 0 \quad (۵)$$

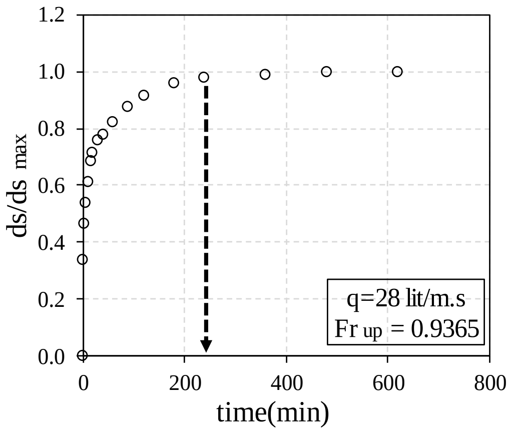
در اینجا؛ $Fr_{up} = \frac{V_{up}}{\sqrt{gH_{up}}}$ عدد فرود (بی‌بعد) است.

مراحل انجام آزمایش‌ها به این صورت بود که پس از عبور دبی تخلیه‌ی مجاز از روی سرریز، دریچه‌ی پای‌آب برای تشکیل پرش هیدرولیکی در پنجه‌ی سرریز تنظیم شد و پس از دست‌یابی به شرایط پرش پایدار، سرعت جریان، طول پرش، عمق آب در بالادست و پایین‌دست سرریز، عمق متناوب پرش و عمق پای‌آب ثبت گردید. کومار و همکاران در سال ۱۹۹۹ زمانی را به‌عنوان زمان تعادل آب‌شستگی درنظر گرفتند که ۳ ساعت پس از آن، عمق آب شستگی کمتر از ۱ میلی‌متر تغییر کند. از آن‌جا که هدف این تحقیق مقایسه‌ی عمق گودال آب شستگی بوده‌است، لذا معیار فوق برای زمان تعادل انتخاب گردید [18].

بعد از انجام آزمایش‌های شاهد، مطابق شکل (۳) مشاهده شد که با گذر ۲٤۰ دقیقه از لحظه‌ی شروع، روند اثربخشی مشخصه‌های هیدرولیکی جریان بر ابعاد گودال آب‌شستگی متوقف گردید. بنابراین، تمام آزمایش‌ها در مدت زمان ۲٤۰ دقیقه انجام شدند که با

نتایج مطالعات قبلی در مورد آب‌شستگی هم‌خوانی دارد [19].

سپس پروفیل فرسایشی (حداکثر عمق و طول آب‌شستگی) در محدوده‌ی گودال، متناسب با بستر رسوبی اولیه که به‌واسطه‌ی مختصات‌دهی (x,y) مش‌بندی شده‌بود، اندازه‌گیری شد. درنهایت داده‌های جمع‌آوری‌شده مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت.



شکل ۳ بررسی توسعه‌ی زمانی آب‌شستگی در شرایط شوت بدون بلوک

روابط (٦) تا (٩) برخی از معادلات ارائه‌شده توسط محققان دیگر برای محاسبه‌ی حداکثر عمق آب‌شستگی پایین‌دست سرریز صاف را نشان می‌دهند. برای اطمینان از صحت داده‌های به‌دست‌آمده در مدل آزمایشگاهی، داده‌های اندازه‌گیری‌شده در مدل شوت بدون مانع (آزمون شاهد)، با حداکثر عمق آب شستگی محاسبه شده از این روابط کالیبره شد [16]. روابط زیر به‌ترتیب توسط اسچوکلیش (۱۹۳۲)، نواک (۱۹٦۱)، کوتلاس (۱۹٧٦) و ئو در سال ۱۹٧۳ گزارش شده‌اند.

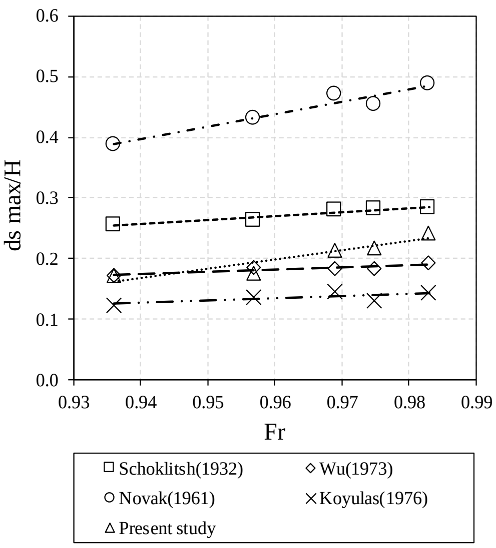
$$d_s = \left(\frac{0.521 q^{0.57} {H_{up}}^{0.2}}{d_{90}^{0.32}}\right) - h_t \quad (٦)$$

$$d_s = 0.55(6{H_{up}}^{0.25} q^{0.5} (\frac{h_t}{d_{90}})^{\frac{1}{3}} - h_t) \quad (٧)$$

$$d_s = 0.78(\frac{{h_t}^{0.35} q^{0.7}}{d_{90}^{0.4}}) \quad (٨)$$

$$d_s = 2.11\ H_{up}(\frac{q}{(g{H_{up}}^3)^{\frac{1}{2}}})^{0.51} \quad (٩)$$

در این روابط؛ d_s عمق نهایی آب‌شستگی، h_t عمق پای‌آب، H_{up} اختلاف تراز آب بالادست سرریز و پای‌آب، q دبی در واحد عرض و d_{90} معرف اندازه‌ای است که ۹۰٪ از ذرات رسوبی از آن کوچک‌تر هستند.



شکل ٤ مقایسه‌ی نسبی بین نتایج تجربی مطالعه‌ی حاضر (مدل شاهد) با محققان دیگر

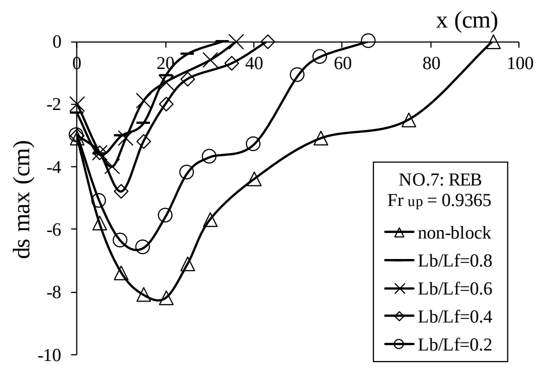
شکل (٤) مقایسه‌ی نسبی بین نتایج تجربی برای مدل شاهد را با معادلات ارائه شده‌ی (٦) تا (٩) نشان می‌دهد. مشاهده شد که معادلات تجربی ارائه‌شده مقادیر بسیار نزدیکی با عمق آب‌شستگی به‌دست‌آمده از مطالعه‌ی حاضر را نشان می‌دهند. از طرف دیگر، مطابق داده های برازش داده‌شده، معادله‌ی Novak مقادیر بیشتری از $\frac{d_s}{H_{up}}$ را نسبت به دیگر معادلات نشان می‌دهد. از بین این معادلات، معادله‌ی Wu تخمین خوبی از عمق آب شستگی اندازه‌گیری شده، نشان داده‌است؛ بنابراین می‌توان گفت که صحت داده‌های تجربی مدل شوت با پایه‌ی بافل درمقایسه با معادلات جمع‌آوری‌شده در

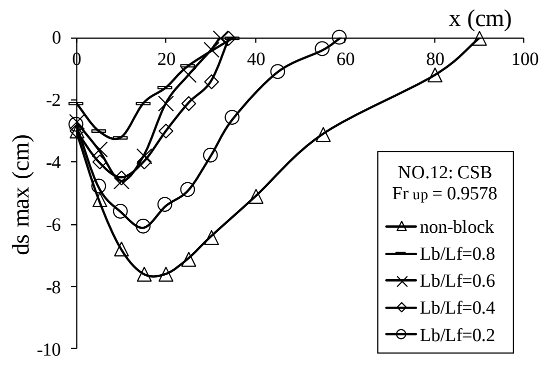
شـــکل (٤) قابل قبول اســـت. اختلافات اندک موجود می‌تواند به‌دلیل شرایط متفاوت آزمایشگاهی باشد.

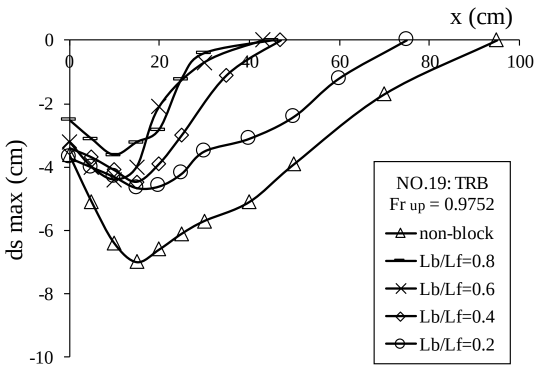
نتایج و بحث

توپوگرافی بستر

بااســـتفاده از داده های مربوط به آب‌شـــســـتگی و رســـوب‌گذاری در پایین‌دســـت مدل‌های آزمایشـــگاهی، پروفیل عمقی و طولی سطح بستر فرسایشی در دبی‌های مختلف و مشـــخصـــه‌های مختلف پایه‌ی بلوک ترســـیم شده‌است. کاملا واضح است که در همه‌ی موارد نصب بلوک‌ها ســـبب کاهش عمق و طول آب‌شـــســـتگی نهایی شده‌است. آن‌چه که مشخص است بلوک‌های مستطیلی حداقل مقدار عمق آب‌شستگی را در امتداد خط شعاعی نشـــان می‌دهند. براین‌اســـاس، می‌توان نتیجه گرفت که اســـتفاده از شـــکل‌های متفاوت بلوک‌های پیشـــنهادی بر نتایج آزمایش اثرگذار است و حداکثر عمق آب‌شستگی را کاهش می‌دهد (شکل ۵).







شکل ۵ پروفیل آب‌شستگی بستر در شرایط متفاوت هندسی و موقعیت نسبی نصب بلوک‌ها

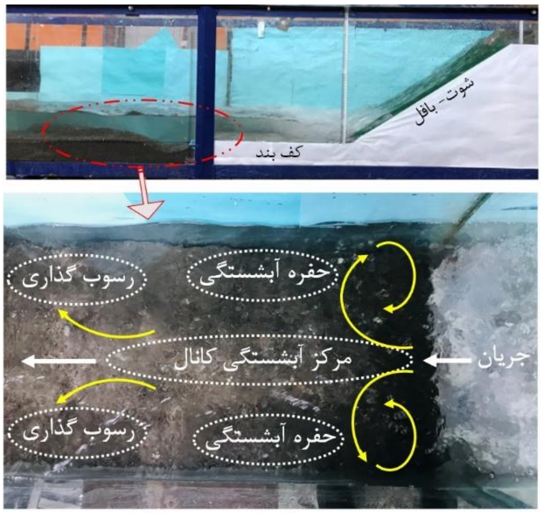
مشـاهده‌های آزمایشـگاهی نشـان می‌دهد که طول جریان روی شـــوت بافل‌دار به دو محدوده از طول هوادهی شده و غیر هوادهی شده تقسیم می‌شود. به‌نظر می‌رسد طول محدوده‌ی غیرهوادهی برای بهبود راندمان هوادهی به جریان بســـیار حائز اهمیت اســـت و این محـدوده بـا افزایش عمق جریـان بحرانی روی تـاج، افزایش می‌یابد.

هم‌چنین جریـان اطراف بلوک‌هـا در دبی‌هـای مختلف موجب تمایز رژیم جریان روی شوت می‌شود. اول جریانی است که از روی بلوک به صورت جهشی عبور می‌کند، که در شـرایط نصـب تقعر دربرابر جریان بلوک‌ها با انرژی جنبشی بیشتری نسبت به الگوی نصب تحدب دربرابر جریان، رخ داده‌اســـت. دوم جریان هم‌گرایی که از بین بلوک‌ها برقرار اســـت و ســـوم جریانی که به‌صورت گردابی و کف‌آلود در جلو و داخل بلوک‌ها شـکل گرفته و موجب افزایش روگذری جریان از روی بلوک‌ها می‌شـود. ازاین‌رو، وجود بلوک سـبب افزایش تلاطم و کاهش انرژی جریان در انتهای شـــوت می‌شـــود و درنهایت با تضـــعیف پرش هیدرولیکی در پنجه‌ی ســـرریز، موجب کاهش انتقال رســـوب به پایین‌دست می‌شود.

آنچه مشـــخص اســـت، پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی در میانه‌ی عرضی بستر فرسایشی، کاهش یافته‌است و الگوی آب‌شستگی برای همه مدل‌های مورد

بررسی تقریبا متقارن است. هم‌چنین، حداکثر مقدار آب‌شستگی به‌دلیل جریان‌های ثانویه و گردابه‌های شکل‌گرفته، در دو طرف خط مرکز طولی بستر رسوبی نمایان شده‌است. محل حداکثر عمق آب‌شستگی نیز همیشه در نزدیکی بستر ثابت رخ داده‌است. شایان ذکر است، در شرایط نصب بلوک‌های حفاظتی، موقعیت رخداد عمق حداکثر گودال آب‌شستگی به بستر ثابت کف‌بند، نزدیک‌تر شده‌است (شکل٦).

از نگاه هیدرودینامیکی مشخص است که درصورتی‌که بتوان نیروی رانشی بزرگ‌تری دربرابر جریان ایجاد کرد، به مقدار بیشتری از شتاب جریان کاسته می‌شود، که این خود موجب کاهش عمق و طول آب‌شستگی می گردد. ازاین‌رو، در پژوهش حاضر با انجام دو سری آزمایش، با تفاوت در تقعر- تحدب نصب بلوک‌ها، نشان داده‌شد که در شرایط نصب تحدب دربرابر جریان، مطابق مشاهده‌های آزمایشگاهی در شکل (٧-a) با تضعیف جریان‌های جهشی، علی‌رغم تسهیل عبور جریان از حدفاصل بین بلوک‌ها و افزایش طول مسیر پیمایش جریان در طول شوت، با مقدار اتلاف انرژی کمتر نسبت به حالت تقعر دربرابر جریان، احتمال رخداد کاویتاسیون متأثر از تشکیل گردابه‌های چرخشی و ایجاد ناحیه‌ی کم‌فشار در قسمت پشت هر بلوک (ایجاد فشار منفی) افزایش می‌یابد. هم‌چنین شکل (٧-b) نشان- دهنده‌ی تقعر دربرابر جریان بلوک‌ها می‌باشد که مطابق اصول مومنتوم جریان سبب کاهش آنی شتاب حجم زیادی از جریان در قسمت جلوی بلوک‌ها می‌شود و با ایجاد گردابه‌های چرخشی- برگشتی روبه‌بالا، سبب افزایش تلاطم و انسداد بیشتر در مسیر عبور جریان از حدفاصل بین بلوک‌ها می‌شود. در این الگوی نصب، پرش هیدرولیکی به‌صورت جریان کم‌انرژی، کف‌آلود و مملو از حباب‌های هوا خود را در پنجه‌ی سرریز نمایان می‌سازد، که این خود با کاهش توان فرسایشی و روبه‌جلوی جریان، علت اصلی کاهش رسوبات حمل- شده به پایین‌دست است. درنهایت، کاهش ۲۰-۱۰ درصدی در مقادیر عمق نهایی آب‌شستگی نسبت به الگوی نصب تحدب دربرابر جریان بلوک‌ها رخ داده‌است.



شکل ٦ پلان محدوده‌ی آب‌شستگی با نمایش جهت جریان‌های ثانویه



(a)



(b)

شکل ۷ تغییرات الگوی جریان روی شوت با تفاوت در تقعر بلوک‌های نیم‌دایره‌ای

تأثیر پایه‌ی بلوک بر عمق گودال آب‌شستگی

شکل (۹) ارتباط بین عدد فرود (Fr_{up}) و پارامتر بدون‌بعد عمق آب‌شستگی $(\frac{d_s}{H_{up}})$ را برای اشکال متفاوت

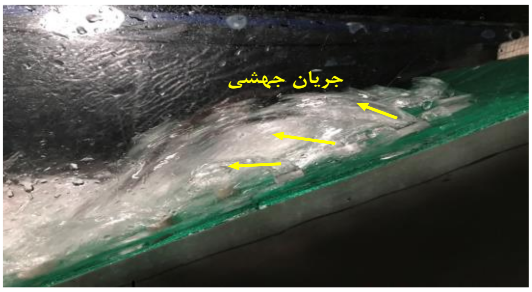
بلوک (مستطیل، نیم‌دایره و مثلث)، باتوجه به موقعیت نسبی نصب در (L_b/L_f =0.2, 0.4, 0.6, 0.8) و هم‌چنین تفاوت در جهت تقعر- تحدب نصب بلوک‌ها را نشان می‌دهد.

باتوجه به صعودی بودن نمودار برای همه‌ی مدل‌ها، مشخص است که با افزایش عدد فرود جریان (Fr_{up}) و درواقع پایدار شدن پرش هیدرولیکی (باتوجه به گروه پرش‌های ایجادشده در این تحقیق)، همواره پارامتر عمق آب‌شستگی نسبی ($\frac{d_s}{H_{up}}$) افزایش بیشتری را از خود نشان می‌دهد. هم‌چنین، نتایج نشان داد که همه‌ی الگوهای نصب پایه‌ی بلوک، بر ابعاد گودال آب‌شستگی مؤثر است و همواره مقادیر $\frac{d_s}{H_{up}}$ به‌دست‌آمده کوچک‌تر از حالت شوت صاف (بدون بلوک) است.

همان‌طور که توضیح داده شد؛ علاوه‌بر موقعیت نسبی نصب، جهت تقعر- تحدب در نصب بلوک‌ها نیز بر مقادیر نهایی ابعاد گودال آب‌شستگی مؤثر است. ازاین‌رو، لزوم بررسی تأثیر توأمان این دو متغیر بر پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی مورد توجه این تحقیق قرار گرفته‌است.

مطابق الگوی نصب ارائه‌شده در شکل (۱) و باتوجه به جهت نصب تقعر بلوک‌ها، گفتنی است که با افزایش فاصله‌ی نسبی نصب الگوی چهار ردیفه‌ی بلوک‌ها تا لبه‌ی تاج سرریز، کاهش عمق آب‌شستگی بیشتری در مدل‌های تقعر دربرابر جریان نسبت‌به حالت متناظر تحدب دربرابر جریان بلوک‌ها مشاهده شده‌است. برای هر سه شکل هندسی، همواره شرایط تقعر دربرابر جریان در دورترین فاصله‌ی نصب تا تاج سرریز (L_b/L_f=0.8) بیشترین اثربخشی بلوک‌ها بر عمق نهایی گودال آب‌شستگی نسبت‌به سایر مدل‌ها رخ داده‌است. در این شرایط، عمق نهایی آب‌شستگی به‌طور متوسط به‌مقدار تقریبی ۳۸/٤ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش یافته‌است.

نکته‌ی دیگری که می‌توان بیان کرد، آن است که در حالت تقعر نصب روبه‌بالای بلوک‌ها، در موقعیت‌های ابتدا تا میانه‌ی طول شوت (برای مثال در L_b/L_f=0.2 , 0.4) مطابق مشاهده‌های عینی نشان داده شده در شکل (۸)، جریان جهشی (آبشار) قوی‌تری از روی بلوک‌ها به پایین‌دست پرتاب می شود و علی‌رغم افزایش استهلاک انرژی و انتقال اکسیژن به جریان، سبب کاهش دبی تخلیه می‌شود. از طرفی دیگر افزایش نامتعارف ۵ تا ۹ برابری عمق جریان روی شوت، هزینه های اجرایی دیوارهای جانبی سرریز را با رشد قابل‌توجهی همراه خواهد ساخت و منطقی نیست که در طراحی بلوک‌ها تقعر نصب در نیمه‌ی بالایی طول شوت دربرابر جریان انتخاب شود. لازم به ذکر است که مدل‌سازی نرم‌افزاری جریان روی شوت و رسیدن به درک بهتر از این موضوع می‌تواند کمک قابل توجهی به طراحی قبل از اجرا در این رابطه کند.

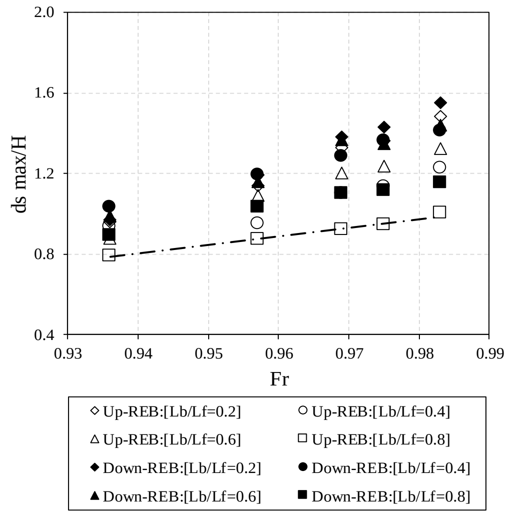


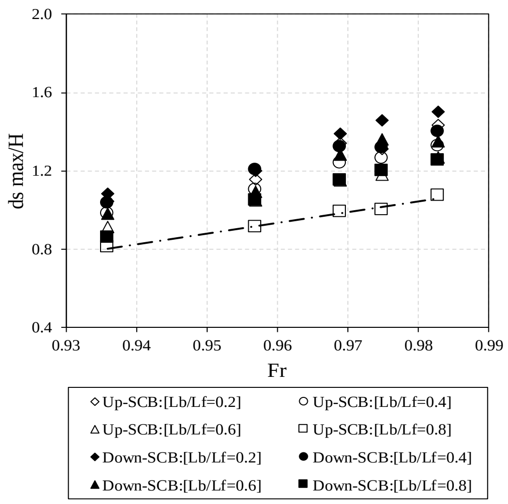
شکل ۸ جریان جهشی در موقعیت نصب L_b/L_f=0.2 , 0.4 و تقعر دربرابر جریان بلوک‌های مثلثی

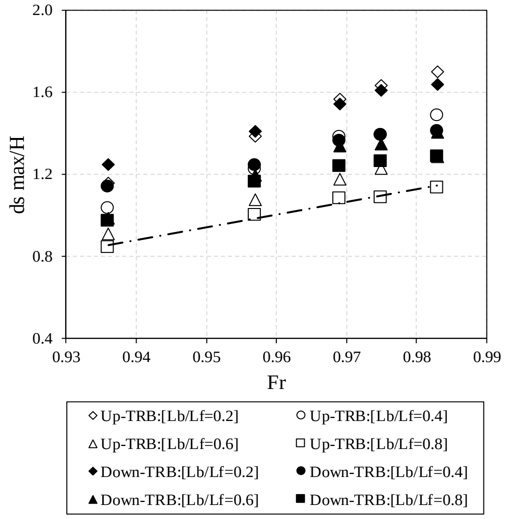
لازم به ذکر است، در تمامی آزمایش‌ها با افزایش دبی و به‌تبع آن عدد فرود جریان برروی تاج سرریز، جریان روگذر کمتر حضور بلوک‌ها را حس می‌کند و با پروفیل سطح آب مشابه رژیم جریان صاف در مدل شاهد (بدون پایه‌ی بلوک) خود را به پنجه‌ی شوت می‌رساند.

شکل (۱۰) با ارائه‌ی خلاصه‌ای از کارآمدترین الگوهای نصب در هر یک از اشکال هندسی متفاوت بلوک‌ها به تسهیل مقایسه‌ی پارامتر نسبی عمق آب‌شستگی در اعداد فرود متفاوت جریان پرداخته‌است. به‌راحتی می‌توان فهمید که برای شرایط یکسان

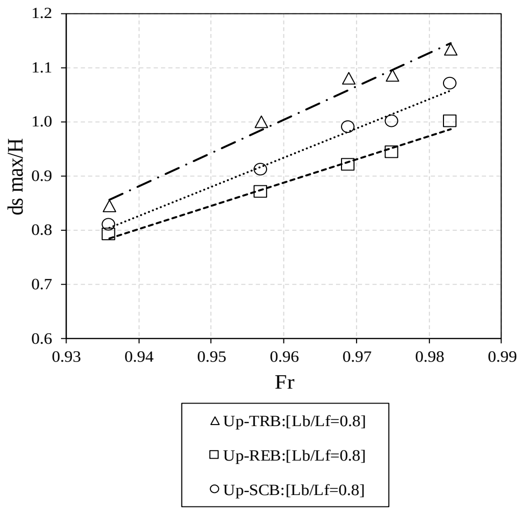
درنظر گرفته‌شده، جهت نصب تقعر همه‌ی شکل‌های هندسی بلوک ها دربرابر جریان و موقعیت نصب L_b/L_f=0.8 در کاهش عمق نهایی گودال آب‌شستگی موثرتر برآورد شده‌است، اما آن‌چه که در شکل (۱۰) به‌وضوح مشخص است، علاوه‌بر جهت تقعر و موقعیت نسبی نصب در طول شوت، تأثیر تفاوت در شکل هند سی بلوک‌ها، نقش پررنگ‌تری بر پارامترهای ابعادی گودال آب شستگی دارد. در شرایط اعداد فرود متفاوت جریان، هند سه‌ی مستطیلی بلوک با تقعر دربرابر جریان، سبب رخداد حداقل عمق نسبی آب شستگی نسبت‌به سایر مدل‌ها شده و مقدار نسبی $\frac{d_s}{H_{up}}$ را درمقایسه با حالت شاهد (بدون بلوک)، بین ۲۵ تا ۶۱/۲ درصد کاهش داده‌است.







شکل ۹ تغییرات عمق آب‌شستگی نسبی دربرابر اعداد فرود و موقیعت نصب متفاوت نصب بلوک‌ها: (a) بلوک مستطیلی، (b) بلوک نیم-دایره‌ای، (c) بلوک مثلثی



شکل ۱۰ مقایسه‌ی اثربخشی سه شکل هندسی بلوک بر مقدار عمق آب‌شستگی نهایی در بهترین موقعیت نصب

تأثیر پایه‌ی بلوک بر طول گودال آب‌شستگی

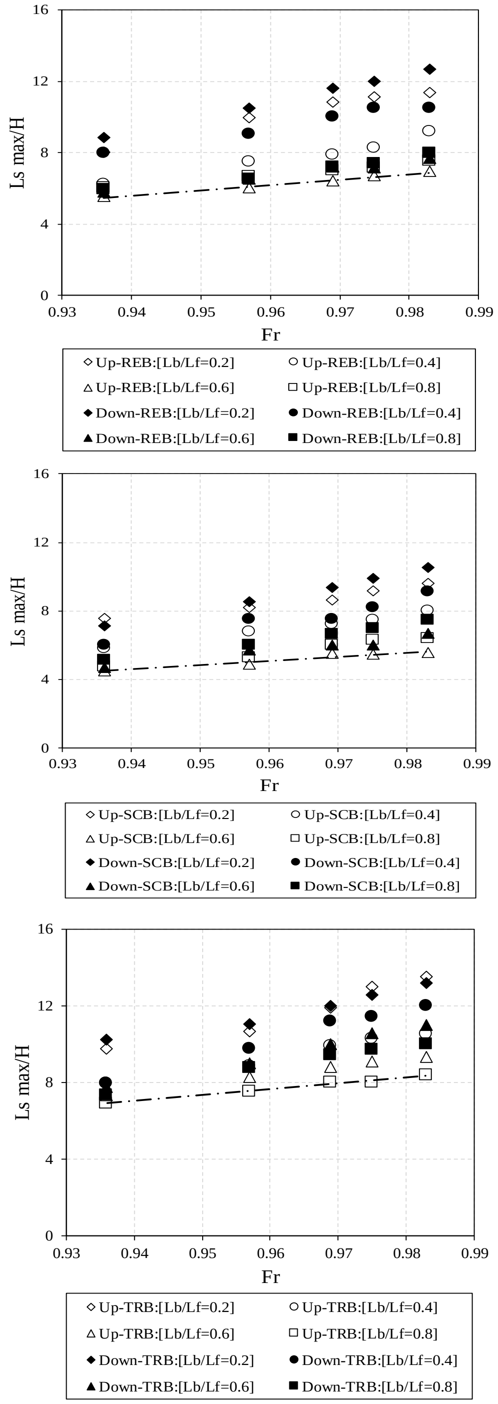
شکل (۱۱) نیز ارتباط بین عدد فرود (Fr_{up}) و پارامتر بدون‌بعد طول آب‌شستگی ($\frac{L_s}{H_{up}}$) را برای اشکال متفاوت از بلوک‌ها (USBR، نیم‌دایره‌ای، مثلثی) و فاصله‌ی نسبی نصب در (L_b/L_f =0.2, 0.4, 0.6, 0.8) و هم‌چنین تفاوت در جهت‌گیری نصب تقعر- تحدب بلوک‌ها را نشان داده است.

در اینجا نیز همانند نمودارهای مربوط به عمق آب‌شستگی، نشان داده‌شد که در همه‌ی الگوهای نصب پایه‌ی بلوک، مقادیر $\frac{L_s}{H_{up}}$ کوچک‌تر از حالت شوت صاف (بدون بلوک) رخ داده‌است. شایان ذکر است که افزایش عدد فرود جریان (Fr_{up}) سبب ایجاد نموداری صعودی برای همه‌ی مدل‌ها شده و همواره پارامتر طول آب‌شستگی نسبی ($\frac{L_s}{H_{up}}$) افزایش یافته‌است. به‌نظر می‌رسد که افزایش دبی و عدد فرود جریان در بالادست سرریز، سبب ایجاد جریان‌های گردابه‌ای و ناحیه‌ی کم‌فشار در پشت پایه‌ی بلوک‌ها شده که این خود با افزایش انسداد جریان بین بلوک‌ها منجر به تقویت جریان‌های روگذر و سرکوب جریان‌های جهشی از روی بلوک‌ها، شده‌است. درنتیجه با پایدار شدن پرش و افزایش اتلاف انرژی متأثر از حضور بلوک‌ها در مسیر جریان، طول گودال آب‌شستگی کمتری رخ داده‌است.

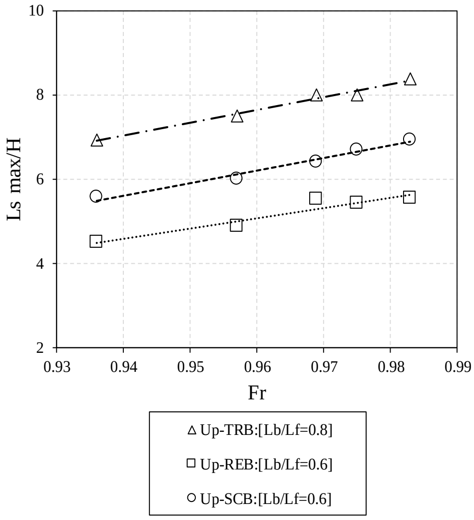
نکته‌ی قابل تذکر دیگر این است که تأثیرگذاری متغیرهای موقعیت نسبی نصب و جهت تقعر- تحدب نصب بلوک‌ها بر مقادیر نهایی طول آب‌شستگی مؤثرتر از مقادیر عمق گودال آب‌شستگی متناظر است. با افزایش موقعیت نسبی نصب بلوک‌ها تا لبه‌ی تاج سرریز، به‌دلیل راندمان اتلاف انرژی بیشتر در انتهای شوت، سبب افزایش اعماق مزدوج پرش در پنجه می‌شود و از توان فرسایشی و روبه جلوی جریان می‌کاهد. برای هر سه شکل هندسی، نصب بلوک‌ها در موقعیت نسبی (L_b/L_f=0.8) با تقعر دربرابر جریان، کاهش چشم‌گیری را در طول نهایی گودال آب‌شستگی نسبت به سایر مدل‌ها نشان داده‌است. در این شرایط، طول نهایی آب‌شستگی به‌طور متوسط به مقدار تقریبی ۶۳/۷ درصد نسبت به حالت شاهد کاهش یافته‌است.

به‌نظر می‌رسد که افزایش سطح اشغال‌شده‌ی بلوک‌ها به‌خصوص در هندسه‌ی مستطیلی، دلیل انسداد بیشتر جریان در حدفاصل بین این بلوک‌ها بوده‌است و تقعر دربرابر جریان بلوک‌ها نیز مطابق آن‌چه بیان شد، دلیل افزایش انسداد و گردابه‌های چرخشی- برگشتی روبه‌بالای جریان و درنهایت کاهش طول آب‌شستگی در پایین‌دست است.

شکل (۱۲) نیز برای جمع‌بندی و مقایسه‌ی پارامتر نسبی طول آب‌شستگی به‌صورت خلاصه‌ای از کارامدترین الگوهای نصب برای اشکال هندسی متفاوت بلوک‌ها در اعداد فرود متفاوت جریان آورده شده‌است.



شکل ۱۱ تغییرات طول آب‌شستگی نسبی دربرابر اعداد فرود و موقعیت‌های نصب متفاوت بلوک‌ها: (a) بلوک مستطیلی، (b) بلوک نیم‌دایره‌ای، (c) بلوک مثلثی

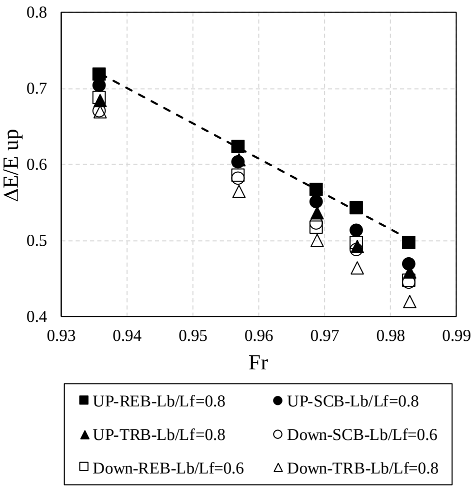


شکل ۱۲ مقایسه‌ی اثربخشی سه شکل هندسی بلوک بر مقدار طول آب‌شستگی نهایی در بهترین موقعیت نصب

مقایســـه‌ی نتایج نشـــان می‌دهد که کاهش طول آب‌شـــســـتگی نیز در شـــرایط تقعر دربرابر جریان برای همه‌ی شـــکل‌های هندســـی بلوک‌ها عملکردی مؤثرتر داشـــته‌اســـت، اما آن‌چه که در شـــکل (۱۲) به‌وضـــوح مشخص است، علاوه‌بر جهت تقعر، شکل هندسی و هم‌چنین موقعیت نسبی نصب بلوک‌ها در طول شوت، نقش پررنگ‌تری بر پارامترهای ابعادی گودال آب‌شستگی دارد. در شرایط اعداد فرود متفاوت جریان، هندســـه‌ی مســـتطیلی با تقعر دربرابر جریان و موقعیت نسبی نصب $L_b/L_f=0.6$ سبب رخداد حداقل طول نسبی آب‌شستگی نسبت به سایر مدل‌ها شده و مقدار نسبی $\frac{L_s}{H_{up}}$ را درمقایســـه با حالت شـــاهد (بدون بلوک)، بین ۳۸/۱ تا ۷۳/٤ درصد کاهش داده‌است.

براساس نتایج به‌دست‌آمده در شکل (۹) و (۱۲) به بررســـی میزان اتلاف انرژی نســـبی در پنجه‌ی شـــوت به‌همراه پایه‌ی بلوک درمقابل عدد فرود بالادست سرریز پرداخته‌شد.

مطابق شکل (۱۳) گفتنی است که با افزایش عدد فرود جریان در بالادست، انرژی نسبی مستهلک شده، کاهش می‌یابد. همان‌طور که در تشـــریح دلایل تغییرات ابعاد هندسی گودال آب‌شستگی بیان شد، می‌توان این امر را این‌گونه بیان کرد که افزایش عدد فرود جریان بالادست (افزایش دبی) احتمالا سبب کاهش تأثیرگذاری پایه‌های بلوک بر الگوی جریان روی شوت شده‌است. هم‌چنین، مطابق نتایج ارائه‌شـــده برای هندســـه‌ی گودال آب‌شستگی و حجم رسوبات انتقال‌یافته در پایین‌دست کف‌بند انتهایی، بلوک‌های مســـتطیلی با تقعر دربرابر جریان و در موقعیت نسبی نصب $L_b/L_f=0.8$ علاوه‌بر عملکرد بهینه با رویکرد حفاظتی در کاهش انتقال رســـوب، درراســـتای اســـتهلاک انرژی در پایین‌دســـت سرریزها نیز بهینه‌ترین الگو گزارش می‌شود.



شکل ۱۳ مقایسه‌ی اثربخشی سه شکل هندسی بلوک بر مقدار اتلاف انرژی در موقعیت‌های نصب بهینه

جدول ۲ مقایسه‌ی عملکرد بلوک در این تحقیق با سایر محققان

محققان و سال	شرایط آزمایش	روش حفاظتی	نتایج و میزان کاهش آب‌شستگی
تحقیق حاضر	استفاده از شوت با زاویه‌ی ۳۰ درجه، محدوده‌ی دبی ورودی بین ٦/٥ تا ١٤/٤ لیتر بر ثانیه	نصب الگوی چهارردیفه‌ی بلوک‌های بافل با شکل‌های متفاوت	عملکرد بهتر بلوک مستطیلی در کاهش متوسط ٤٣/١ و ٥٦/٧ درصدی به‌ترتیب برای عمق و طول نهایی گودال آب‌شستگی در موقعیت نصب L_b/L_f=0.8 , 0.6 و تقعر دربرابر جریان
Dargahi (2003)	استفاده از سرریز اوجی شکل، با محدوده‌ی دبی ۲۰ تا ۱۰۰ لیتر بر ثانیه	به‌کارگیری صفحه‌ی محافظتی با زبری‌های متفاوت	افزایش زبری صفحه‌ی حفاظتی، سبب کاهش شدید انتقال رسوب و گودال آب‌شستگی به‌میزان ۱۷ الی ۵۷ درصد نسبت به حالت بدون زبری
Mohammed (2004)	استفاده از باکت در آستانه‌ی انتهایی سرریز	به‌کارگیری زوایای مختلف در انحنای باکت	کاهش ۱۵ درصدی عمق آب‌شستگی پایین-دست با تغییر زاویه‌ی آستانه‌ی انتهایی سرریز از ۱۰ به ٦٠ درجه
Dermawan and Legono (2011)	استفاده از سرریز پلکانی	به‌کارگیری پلکان در سرریز	بالا بردن پلکان عمق جریان در پنجه‌ی سرریز حدود ۲۰ برابر شوت‌های صاف معمولی و درنتیجه کاهش انرژی باقی‌مانده در پنجه حدود ٦ تا ۷ برابر نسبت به شوت صاف
Zare and Doering (2012)	استفاده از شوت در سرریز اوجی در اعداد فرود مختلف	به‌کارگیری روش‌هایی هم‌چون بافل و سنگ‌چین روی شوت	نرخ اتلاف انرژی بالاتری را می‌توان در شرایط نصب بافل در مقایسه با سنگ‌چین روی شیب شوت‌ها بدست آورد.
Chahardahcheriki gholi zadeh & Shafai-Bajestan (2016), [20]	استفاده از سطح شیب‌دار، محدوده‌ی عدد فرود بین ٥/٧٦ تا ٩/١٣	به‌کارگیری المان‌های شش‌پایه	کاهش ٦١ درصدی عمق آب‌شستگی نهایی نسبت به حالت ساده با اعمال المان‌های شش‌پایه، و کاهش ٥٦ درصدی عمق آب‌شستگی با افزایش اندازه‌ی ذرات رسوبی
Aydin & Ulu (2018), [21]	شبیه‌سازی با نرم‌افزار flow-3D	به‌کارگیری پنج شکل متفاوت بلوک در حوضچه‌ی آرامش	(همه‌ی مدل‌ها، به‌طور قابل‌ملاحظه‌ای در افزایش اتلاف انرژی و کاهش آب‌شستگی پایین‌دست سازه تأثیرگذارند) کاهش مقدار آب‌شستگی نهایی در حدود ٪۸۰ تا ٪۹۰ بااستفاده از بلوک مثلثی- بالادست پلکانی
Elnikhely (2018), [22]	استفاده از شوت مانع‌دار با پنج دبی متفاوت	به‌کارگیری بلوک استوانه‌ای با ابعاد هندسی متفاوت	کاهش مقادیر عمق و طول نسبی آب‌شستگی نسبت به حالت صاف به‌ترتیب حدود ٪۲۵ و ٪۲۷ (بهترین ابعاد بلوک‌ها (L/B=0.133، D/B=0.1) است)
Karimi Chahartaghi et al. (2019)	استفاده از شوت مانع‌دار	به‌کارگیری هندسه‌ی متفاوت بافل و هم‌چنین واگرایی مختلف دیواره‌ی جانبی شوت	به‌طور متوسط، کاهش حداکثر تا ۵۸ درصد عمق و طول نهایی گودال آب‌شستگی بااستفاده از بلوک‌های پیشنهادشده در این تحقیق به‌جای بلوک‌های استاندارد USBR

درنهایت با ارائه‌ی خلاصه‌ای(جدول ۲) از شرایط آز مایش و روش های حفاظتی برای بررسی میزان تأثیرگذاری روش‌های به‌کاررفته بر کاهش ابعاد گودال آب‌شستگی در پایین‌دست سرریزها در تحقیق حاضر و دیگر محققان آورده شده‌است. آن‌چه که به‌وضوح مشخص است، استفاده از بلوک در حوضچه‌ی آرامش یا روی شیب شوت‌ها به‌عنوان یک روش مؤثر موجب کاهش در ابعاد نهایی گودال آب‌شستگی می‌شود.

نتیجه‌گیری

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر به‌منظور بررسی روش حفاظتی پایه‌ی بلوک در یک شوت ساده برروی مشخصه‌های ابعادی گودال آب‌شستگی انجام شد. بحث و تحلیل نتایج عبارتند از:

۱. جریان اطراف بلوک‌های شوت در دبی‌های مختلف موجب تمایز رژیم جریان روی شوت می‌شود. نخست جریانی است که از روی بلوک به صورت ریزشی عبور می‌کند. این نوع جریان در شرایط نصب رو به جریان تقعر بلوک‌ها با انرژی جنبشی بیشتری همراه است. دوم جریان هم‌گرایی که از بین بلوک‌ها برقرار است و سوم جریانی که به‌صورت گردابی و کف‌آلود در جلو و داخل بلوک‌ها شکل گرفته‌است و موجب افزایش روگذری جریان از روی بلوک‌ها می‌شود.
۲. تأثیر موقعیت نصب بلوک درست بعد از تاج سرریز ($L_b/L_f=0.2$) بر اتلاف انرژی تقریبا ناچیز است، زیرا جریان هنوز در عمق بالا است و سرعت نسبتا کمی دارد.
۳. عمق و طول نهایی آب شستگی با افزایش عدد فرود بالادست سرریز، افزایش یافته‌است. هم‌چنین برای یک عدد فرود ثابت، عمق و طول آب شستگی برای هندسه‌ی مستطیلی بلوک با تقعر دربرابر جریان به‌مراتب کمتر از دو هندسه‌ی دیگر بوده‌است.
٤. با بررسی داده‌های مربوط به هر کدام از موقعیت‌های نسبی نصب بلوک‌ها به‌طور دقیق می‌توان پی برد که با افزایش L_b/L_f بلوک‌ها، کاهش عمق آب‌شستگی افزایش یافته‌است، به‌طوری‌که در موقعیت ($L_b/L_f=0.8$) اثر بخشی بهتری نسبت به سایر موقعیت‌ها رخ داده‌است. در شرایط مختلف جریان بین ۲۵ تا ٦۱/۲ درصد کاهش عمق گودال آب‌شستگی را به‌همراه دارد.
۵. در موقعیت ($L_b/L_f=0.6$)، بلوک‌های مستطیلی و نیم-دایره‌ای با تحدب دربرابر جریان و هم‌چنین، در موقعیت ($L_b/L_f=0.8$) بلوک مثلثی با تقعر دربرابر جریان، با عملکرد متوسط ۳۸/۱ تا ۷۳/٤ درصد، بیشترین کاهش را در طول آب‌شستگی نسبت‌به سایر حالت‌ها دارا بودند.
٦. جهت تقعر نصب بلوک‌ها بر مقادیر پارامترهای آب‌شستگی مؤثر است. در سری آزمایش‌های تقعر دربرابر جریان همواره پارامترهای ابعادی آب‌شستگی دارای مقادیر کمتری نسبت به تحدب دربرابر جریان بوده‌اند.
۷. با افزایش عدد فرود جریان در بالادست، انرژی نسبی مستهلک‌شده، کاهش می‌یابد. مطابق انتظار، بلوک-های مستطیلی با تقعر دربرابر جریان و در موقعیت نسبی نصب $L_b/L_f=0.8$ درراستای استهلاک انرژی در پایین‌دست سرریزها به‌عنوان بهینه‌ترین الگو گزارش می‌شوند.

پیشنهادات

مطالعه‌ی آزمایشگاهی حاضر، با تأکید بر اهمیت ویژه‌ی مدل‌سازی نرم‌افزاری طرح قبل از اجرا و دست‌یابی به بهینه‌ترین شکل هندسی، راستای تقعر- تحدب نصب بلوک در هر موقعیت نسبی را حائز اهمیت می‌داند. هم‌چنین باتوجه به تأثیر متقابل الگوی جریان در اطراف پایه‌ی بلوک‌ها، لزوم بررسی الگوی مرکب در آرایش نصب کامل بلوک‌ها با اشکال هندسی متفاوت پیشنهاد می‌گردد.

مراجع

1. Dargahi, B., "Scour Development Downstream of a Spillway", *Journal of hydraulic research*, Vol. 41, No. 4, Pp. 417-426, (2003).
2. Abdelhaleem, F. S. F., "Effect of Semi-circular Baffle Blocks on Local Scour Downstream Clear-overfall Weirs", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 4, No. 4, Pp. 675-684, (2013).
3. Helal, E. Y., Nassralla, T. H., and Abdelaziz, A. A., "Minimizing of Scour Downstream Hydraulic Structures Using Sills", *International Journal of Civil and Structural Engineering*, Vol. 3, No. 3, Pp. 591, (2013).
4. Helal, E. Y., "Minimizing Scour Downstream of Hydraulic Structures Using Single Line of Floor water jets", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 5, No. 5, Pp. 17-28, (2013).
5. Hong, S., Biering, C., Sturm, T. W., Yoon, K. S., and Gonzalez-Castro, J. A., "Effect of Submergence and Apron Length on Spillway Scour: Case Study", *Water*, Vol. 7, No. 10, Pp. 5378-5395, (2015).
6. Blaisdell, F. W., "Development and Hydraulic Design, Saint Anthony Falls stilling Basin", *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 113, No. 1, Pp. 483-520, (1948).
7. Tuna, M. C., "Effect of Offtake Channel Base Angle of Stepped Spillway on Scour Hole", Pp. 239-251, (2012).
8. Peterka, E. S., and Karon. I. M., "Congenital Pseudoainhum of the Fingers: Report of a Case", *Archives of dermatology*, Vol. 90, No. 1, Pp. 12-14, (1964).
9. Chatila, J. G., and Bassam R. J., "Stepped spillway as an energy dissipater", *Canadian Water Resources Journal/Revue canadienne des ressources hydriques*, Vol. 29, No. 3, pp. 147-158, (2004).
10. Young, M. F., "Feasibility Study of a Stepped Spillway", *In Applying research to hydraulic practice*, Pp. 96-105. ASCE, (1982).
11. Mohammed, T. A., Noor, M. M. M., Huat, B. K., Ghazali, A. H., and Yunis, T. S., "Effect of Curvature and End Sill Angle on Local Scouring at Downstream of a Spillway." *International Journal of Engineering and Technology*, Vol. 1, No. 1, Pp. 96-101, (2004).
12. Dwemawan, V., and Legono, D., "Residual Energy and Relative Energy Loss on Stepped Spillway", *Journal of Applied Technology in Environmental Sanitation*, Vol. 1, No. 4, (2011).
13. Chafi, C., Hazzab, A., and Seddini, A., "Study of Flow and Energy Dissipation in Stepped Spillways", *Jordan Journal of civil engineering*, Vol. 4, No. 1, Pp. 1-11, (2010).
14. Zare, H. K., and Doering, J. C., "Energy Dissipation and Flow Characteristics of Baffles and Sills on Stepped Spillways", *Journal of hydraulic research*, Vol. 50, No. 2, Pp. 192-199, (2012).
15. Kaya, N., and Emiroglu, M. E., "Study of Oxygen Transfer Efficiency at Baffled Chutes." In *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, Vol. 163, No. 9, Pp. 447-456. Thomas Telford Ltd, (2010).

16. karimi Chahartaghi, M., and Solimani B. M., "Effect of Block Geometry and Divergence of Baffled Chute on Downstream Scour Pattern", (2019).
17. Raudkivi, A. J., and Ettema, R., "Clear-water Scour at Cylindrical Piers", *Journal of Hydraulic Engineering*, Vol. 109, No. 3, Pp. 338-350, (1983).
18. Kummar, V., Ranga Raju, K. G., and Vittal, N., "Reduction of Local Scour Around Bridge Piers Using Slot and Collar", *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE,* Vol. 125, No. 12, pp. 1302–1305, (1999).
19. Zolghadr, M., "Effect of Six-Legged Elements Installation Arrangement on Bed Topography Around Wing-Wall Abutments", Pp. 47-57, (2018).
20. Chahardahcheriki, gholi zadeh. P., and Shafai-Bajestan, M., "Scour Dimensions of the Downstream Hydraulic Jump Stilling Basin with Bed Covered with Six-Legs Elements", *Irrigation and Drainage Structures Engineering Research*, Vol. 17, No. 66, Pp. 105-118, (2016). (In Persian)
21. Aydin, M. C., and Ulu, A. E., "Effects of Different Shaped Baffle Blocks on the Energy Dissipation and the Downstream Scour of a Regulator", *Journal of Science and Technolog*, Vol. 8, No. 2, Pp. 69–74, (2018).
22. Elnikhely, E. A., "Investigation and Analysis of Scour Downstream of a Spillway", *Ain Shams Engineering Journal*, Vol. 9, No. 4, Pp. 2275-2282, (2018).